

## Vorwort

Wenn Sie gerne wissen möchten,

- was es mit dem Zwillingsparadoxon auf sich hat,
- woher das Gold bzw. Silber Ihres Ringes oder Kettchens letztlich stammt,
- warum es soviel Eisen auf der Erde gibt,
- warum Uhren in den Bayerischen Alpen tatsächlich anders laufen als in Berlin,
- wie der Himmel im Inneren eines Schwarzen Lochs aussieht
- und vieles andere mehr,

und bereit sind, einige human dargebotene Rechnungen nachzuvollziehen, dann sollten Sie auf jeden Fall weiterlesen!

Das Grundgerüst dieses leichtverständlichen Textes zu den Relativitätstheorien entstand in seiner Urform zunächst als Strukturierungshilfe für die Autoren selbst, während sie ihre ersten Bücher über Einsteins Werk lasen. Mit jeder weiteren ausgewerteten Literaturquelle stieg der Seitenumfang an, wiederholt und konsequent wurde dabei unanschauliches Material verworfen und anschaulicheres eingearbeitet. Das Ergebnis der vieljährigen Beschäftigung mit dieser Thematik ist die vorliegende Einführung mit ihren leicht nachvollziehbaren Formelherleitungen.

Hauptziel dieser Schrift ist es, den Leser unter Anwendung einfacher Schulmathematik an die Spezielle Relativitätstheorie hinzuführen (Kapitel 1) und ihm erste Einblicke in die Allgemeine Relativitätstheorie zu gewähren (Kapitel 2). Diese Theorien sind keine weltfremden Ideenkonstrukte, sondern zählen immerhin zu den Grundpfeilern des heutigen Weltbildes und vieler moderner Wissenschaftszweige, u.a. der Theoretischen Physik, der Teilchenphysik, der Astrophysik und der Kosmologie; außerdem ist die Spezielle Relativitätstheorie eines der Standbeine der relativistischen Quantenmechanik. Auch bei verschiedenen technischen Anwendungen sind die Relativitätstheorien zunehmend im Spiel, z.B. bei der Kernenergieerzeugung, der

Strahlentherapie, der Geodäsie, den satellitengestützten Navigationssystemen (GPS und Nachfolgesysteme) etc.

Der Wunsch nach einem Verständnis von Einsteins Theorien ist unter naturwissenschaftlich Interessierten sehr weit verbreitet und bleibt doch meist unerfüllt. Mit ein Grund dafür ist, daß manche Texte zu sehr an der Oberfläche bleiben, andere nur wortreiche Umschreibungen von im Kern mathematisch einfach darstellbaren Zusammenhängen liefern, wieder andere hingegen den Leser mit vielen zu knapp erläuterten Formeln überfordern. Hier wird nun ein Mittelweg versucht: Mit Schulmathematik etwa auf Mittelstufenniveau, mit eingängigen Gedankenexperimenten, mit treffenden Analogien und nur das Wesentliche zeigenden Abbildungen werden die wichtigsten Aspekte der Relativitätstheorien verständlich dargestellt.

Der Speziellen Theorie wird die erste Hälfte des Buches gewidmet, nicht weil sie zeitlich gesehen zuerst entstanden ist, sondern weil sie sehr viel leichter als die Allgemeine Theorie zu verstehen ist, ja sogar mit der hier verwendeten „kleinen Schulalgebra“ fast vollständig durchdrungen werden kann. Lediglich die Abschnitte 1.10 und 1.14 enthalten wenige einfache Anwendungen der Winkelfunktionen; diese Rechenschritte können aber auch ohne Nachteil für das Gesamtverständnis des Textes übersprungen werden. Für eingefleischte Mathematikabstinenten bietet der Abschnitt 1.17, der auch unabhängig vom Rest des Buches gelesen werden kann, eine alternative Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie, die ganz ohne Formeln zu bewältigen ist.

Auch die Textpassagen der übrigen Abschnitte sind meist so ausführlich gehalten, daß sogar Leser, die einen großen Bogen um sämtliche Gleichungen machen, immer noch einen ausreichenden Eindruck von den Theorien bekommen dürften. Neben der Erarbeitung von interessanten Formeln kommen nämlich Erklärungen der Zusammenhänge und Hinweise auf astronomische Bezüge nicht zu kurz. Gerade am Beispiel der Schwarzen Löcher (Kapitel 3) wird deutlich, wie sehr insbesondere die Allgemeine Relativitätstheorie das heutige Weltbild der Astrophysik beeinflusst. Zur Abrundung schließt der Text mit Kapitel 4 über die verschiedenen Arten von Rotverschiebung einschließlich einigen wichtigen kosmologischen Überlegungen. Die in den verschiedenen Abschnitten beispielhaft erwähnten Typen von Himmelskörpern werden im Anhang A zusammenfassend beschrieben.

Die Fachleute aus der Theoretischen Physik mögen den Autoren einige Vereinfachungen verzeihen; die erschöpfende Diskussion aller Umstände für stets lückenlose Beweisführungen würde viele Einsteiger vom Wesentlichen ablenken. Einige Herleitungen müssen außerdem auf „quasinewtonsche“ Weise erfolgen (v.a. Kapitel 2).

Bei *sorgfältigem*, ggf. *wiederholtem* Studium aller Abschnitte in der vorliegenden Reihenfolge sollte wirklich jedem interessierten Leser der Zugang

zu dieser Materie gelingen. Aber auch jemand, der evtl. nur einen Teil des Textes nachvollziehen kann, mag dies als für sich gewinnbringend empfinden. In diesem Sinne wünschen die Autoren viel Erfolg, zahlreiche Aha-Erlebnisse und vor allem Freude bei der Entdeckungsreise durch dieses immer wieder faszinierende Wissensgebiet.

Ergoldsbach, München, 2008

Dr. G. Beyvers

Dipl.-Phys. Dr. E. Krusch

## Hinweise:

*Aus Platzgründen* werden Wörter wie „Leser“, „Beobachter“, „Astronaut“ etc. nur in männlicher Form verwendet. Die Autoren bitten darum, dies nicht als Vernachlässigung des weiblichen Geschlechts aufzufassen. Das Interesse auch aller Leserinnen ist ausdrücklich willkommen.

Die sogenannte alte Rechtschreibung ist in vielen Punkten eindeutiger als die durch die Rechtschreibreform verordnete Schreibweise. Sie eignet sich daher wesentlich besser zur Vermittlung des vorliegenden Stoffes und wird im gesamten Text verwendet.

## Danksagung

Bis zu seinem viel zu frühen Tod hat uns Herr Priv.-Doz. Dr. Hartmut Schulz bei der Ausarbeitung des Textes geduldig und selbstlos unterstützt. Mit seiner herausragenden Fachkompetenz hat er entscheidend zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen. Warum müssen so großartige Menschen diese Welt oft zu früh verlassen?

Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr. Wolfhard Schlosser und Herrn Priv.-Doz. Dr. Jörg Frauendiener für die kritische Durchsicht des Textes.

Für einige Verbesserungsvorschläge bedanken wir uns ferner bei Frau Dr. Marianne Kupfer, bei Herrn Diplomphysiker Dr. Alexander Unzicker, bei Herrn Dipl.-Ing. Klaus Mischke und bei Herrn cand. rer. nat. Stefan Geier.

Die Abbildungen und den Computer-Satz hat Herr Dipl.-Ing. Klaudius Krusch mit unvergleichlicher Genauigkeit angefertigt. Auch für die Umschlaggestaltung und die Erstellung der Homepage danken wir ihm herzlich.

Als hilfreich empfanden wir nicht zuletzt auch den Service des Springer-Verlages.

# **Kleines 1 × 1 der Relativitätstheorie**

## Hinweise für Lehrer und Fortgeschrittene

Es mag einerseits vermessen erscheinen, Mittelstufenschülern rotierende Schwarze Löcher oder die kosmologische Rotverschiebung nahebringen zu wollen. Andererseits werden solche Phänomene gerade auch in vielen populären Medien aufgegriffen – leider zu oft in unsachgemäßer Weise. Deshalb schien es den Autoren wünschenswert, als Gegengewicht hierzu eine etwas sachlichere Darstellung zu schaffen, ohne jedoch die Faszination der Thematik verloren gehen zu lassen. Der Leser muß natürlich mehr Zeit, Konzentration und Mühe investieren als beim Konsum leichterer Kost: Das Buch versteht sich daher vor allem als Arbeitstext für Interessierte. Der Schwierigkeitsgrad ist aber strikt der Mittelstufenmathematik und -physik angepaßt. Etwas komplexere Themen wurden als Anhänge aus dem Haupttext ausgegliedert.

Im Gegensatz zum üblichen Vorgehen erfolgt der Einstieg in die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) (*Kapitel 1*) direkt über die Einsteinschen Postulate, nicht über den Michelson-Morley-Versuch. Dieser ist zwar für den Fortgeschrittenen lehrreich, der Einsteiger gerät aber mit den dabei angenommenen Rahmenbedingungen (ruhender Äther, variable Lichtgeschwindigkeit) allzuleicht zunächst aufs falsche „Gleis“; und das Dilemma der Physik vor Einstein läßt sich auch einfacher aufzeigen. Die Rechenschritte des Versuchs lernt der Leser trotzdem kennen: in Abschnitt 1.5 (Raumkontraktion), jedoch gleich unter der richtigen Devise: Invarianz von  $c$ .

Fast alle Formelherleitungen beginnen mit einem Gedankenexperiment, obwohl die meisten Beziehungen der SRT auch direkt aus der Lorentz-Transformation ableitbar wären. Für den Anfänger ist es aber viel anschaulicher, wenn er jeweils mit einem Gedankenexperiment starten kann und sieht, wie daraus dann Gleichungen entwickelt werden. Auch die Lorentz-Transformation selbst wird mit einem Gedankenexperiment erarbeitet, da der übliche Weg („Wir nehmen folgenden linearen Ansatz...“) für den Neuling wenig durchsichtig ist. Einige Gleichungsumformungen, die nur Platz eingenommen hätten, ohne den Leser neue Prinzipien zu lehren, wurden

weggelassen. Gleiches gilt für „Prüfungsaufgaben“, diese würden viele Einsteiger doch nur frustrieren. Enthalten sind aber einige Beispielrechnungen und viele Hinweise, die den Leser zum Selberrechnen anregen sollen.

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) (*Kapitel 2*) und die Schwarzen Löcher (*Kapitel 3*) können hier naturgemäß nur beschreibend erklärt werden, oft mittels Analogien. Letztere werden aber nur dort eingesetzt, wo sie physikalisch gerechtfertigt sind.

In *Kapitel 4* werden kosmologische Zusammenhänge (bereits unter Berücksichtigung des aktuellen Weltmodells) aus einer zum Teil ungewohnten Perspektive geschildert, die aber doch wissenschaftlich abgesichert ist (vgl. z.B. Publications of the Astronomical Society of Australia 2004, **21**, 97-109).

Das *Literaturverzeichnis* ist nicht als Empfehlungsliste anzusehen, sondern als Zusammenstellung der verwendeten Quellen. Literaturempfehlungen sind auf diesem Gebiet ein schwieriges Unterfangen, da der Nutzen eines bestimmten Werkes ganz empfindlich von den Mathematikkenntnissen des Lesers abhängt. Ein Versuch sei dennoch gewagt:

- Für die SRT kann „Eine Formel verändert die Welt“ von H. Fritzsche empfohlen werden; leicht zu lesen ist auch „Spacetime Physics“ von Taylor und Wheeler.
- Einfache, aber doch korrekte Darstellungen der ART sind leider extrem dünn gesät. Empfohlen werden kann „Exploring Black Holes“ von Taylor und Wheeler; Grundkenntnisse der Differential- und Integralrechnung sind aber hierfür nötig.
- Für kosmologisch Interessierte ist „Cosmology“ (2. Auflage, 2000) von E.R. Harrison das Nonplusultra.

Für wen, außer dem schon erwähnten Mittelstufenschüler, ist das Buch sonst noch geeignet?

Eventuell auch für den hochmotivierten Hauptschüler und für jedermann mit ausreichenden Algebra-Kenntnissen. Vielleicht können auch einige Studenten der Naturwissenschaften Teile des Textes als propädeutische Lektüre nutzen.

Falls den Autoren nach Drucklegung noch Fehler im Text bekannt werden, erfolgt deren Veröffentlichung unter [www.1x1relativitaet.de](http://www.1x1relativitaet.de). Die Leser können ihrerseits eventuelle Fehlermeldungen an die dort angegebene E-Mail-Adresse richten.